

УДК 524.38

## НЕ-ЛТР-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНИЙ AlI В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ КЛАССОВ

*В.С. Менжесвицкий, В.В. Шиманский, Н.Н. Шиманская*

### Аннотация

В работе представлены результаты расчетов по анализу формирования линий AlI в спектрах звезд поздних спектральных классов (А–К) при отказе от предположения локального термодинамического равновесия. Представлена разработанная 39-уровневая модель атома Al, содержащая уровни с  $l \leq 3$  и  $n \leq 12$  атома AlI и уровень, соответствующий основному состоянию AlII.

На основе исследования профилей линий и эквивалентных ширин в спектре Солнца выполнено уточнение ряда атомных параметров для исследуемых линий AlI ( $\lambda\lambda$  3944.01 Å, 3961.52 Å, 6693.03 Å, 6698.68 Å, 7362.29 Å, 7836.13 Å).

Для выбранных линий AlI рассчитаны и представлены сетки не-ЛТР-поправок к содержанию Al, определенного в предположении ЛТР. Результаты проведенных расчетов для бланкетированных моделей атмосфер Куруца (в широком диапазоне параметров), позволяют сделать вывод, что для атома AlI имеет место эффект «сверхионизации»: основное состояние  $3p$  недонаселено в области формирования спектральных линий. Механизм недонаселения связан с доминированием процессов ионизации ультрафиолетовым излучением с основного уровня над каскадными переходами с высоко возбужденных уровней, причиной чего является большое значение сечения ионизации уровня  $3p$ . Этот эффект выражен тем ярче, чем выше температура звезды и ниже её металличность.

Не-ЛТР-поправки к содержанию алюминия достигают величин  $(0.15 \div 0.25)$  dex для субординатной линии  $\lambda$  6698.68 Å и  $(0.4 \div 0.7)$  dex для субординатной линии  $\lambda$  7836.13 Å; для резонансной линии  $\lambda$  3961.52 Å не-ЛТР-поправки достигают величин  $(0.2 \div 0.45)$  dex, а в случае малой металличности ( $[A] = -2.0$ ) для некоторых моделей атмосфер –  $(0.6 \div 0.8)$  dex.

**Ключевые слова:** химический состав, содержание алюминия, статистическое равновесие, формирование линий, звезды поздних спектральных классов, не-ЛТР-поправки.

---

Наиболее эффективным инструментом для исследования звезд и определения их фундаментальных параметров является метод моделей атмосфер. Однако при выполнении расчетов в рамках гипотезы локального термодинамического равновесия (ЛТР) могут возникать ошибки. Отклонения от ЛТР в заселении атомов по состояниям могут быть вызваны рядом причин, например: ионизацией атомов ультрафиолетовым потоком, выходящим из глубоких слоев атмосферы звезды; инфракрасной фоторекомбинацией электронов на верхние уровни атома, близкие к континууму; каскадными переходами с верхних уровней на нижние; перераспределением атомов по состояниям благодаря фотовозбуждениям.

Для вычисления населенностей уровней при отказе от гипотезы ЛТР требуется совместное решение уравнений переноса излучения и статистического равновесия. Это существенно усложняет расчеты и требует особой методики.

Одной из важных составляющих такой методики является правильно построенная модель атома, содержание которого в атмосферах звезд планируется исследовать.

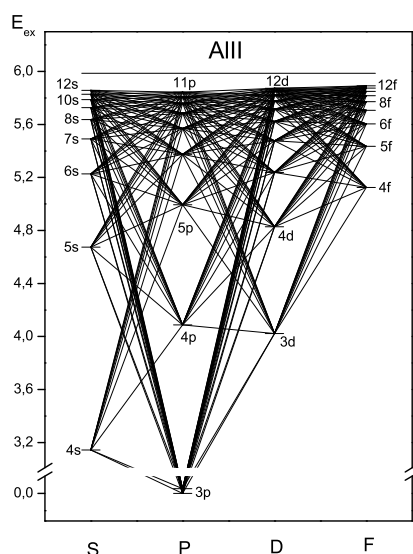


Рис. 1. Модель атома AlI

В настоящей работе представлена 39-уровневая модель атома AlI, содержащая все уровни с  $l \leq 3$  и  $n \leq 12$  атома AlI и уровень, соответствующий основному состоянию AlI. Энергия ионизации с последнего рассматриваемого возбужденного уровня составляет около 0.4 эВ, что позволяет использовать данную модель для анализа содержания AlI в атмосферах звезд с  $T_{\text{eff}} > 4000$  К.

Энергии уровней рассчитаны по длинам волн соответствующих переходов; силы осцилляторов и сечения атомных процессов взяты из базы атомных данных TOPbase [1].

При расчетах учитывалось тонкое расщепление уровня  $3p$  – основного состояния AlI. Учет тонкого расщепления, как было показано ранее в ряде работ по не-ЛТР-моделированию линий некоторых элементов (например, [2, 3]), является важным фактором при расчете отклонения населенностей уровней от равновесных. Отклонения от ЛТР в линии наблюдаются в слоях, где начинается выход фотонов в крыльях линии, то есть где соответствующая оптическая толщина становится меньше 1. Глубина формирования отдельных линий больше, чем суммарной линии, поэтому детальный баланс в переходах  $3p-3d$  начинает нарушаться в более глубоких слоях, чем в случае объединения уровней. Поэтому не-ЛТР-эффекты в заселении уровней и интенсивности линий будут различны для этих случаев.

Диаграмма Гроттриана представленной модели приведена на рис. 1.

Расчеты не-ЛТР-населенностей уровней и эквивалентных ширин линий проводились с помощью программного комплекса NONLTE3 (в последней модификации), разработанного Н.А. Сахибуллиным [4]. В основе этого комплекса лежит метод полной линеаризации в варианте Ауэра и Хисли [5].

При вычислении коэффициента поглощения в непрерывном спектре для каждой частоты были учтены все источники непрерывного поглощения (H, He,  $\text{H}^-$ ,  $\text{H}_2^+$ , атомы и первые ионы наиболее распространенных элементов, рассеяние на электронах и рлеевское рассеяние), а также учитывался вклад многочисленных спектральных линий прямым суммированием на каждой частоте коэффициента поглощения в них. Список линий составлен на основе списка Куруца [6] и содержит около 170 тыс. линий с длинами волн больше 91.2 нм. Учитывалось также молекулярное поглощение по данным, предоставленным Я.В. Павленко (ГАО НАНУ).

Табл. 1

Параметры исследуемых линий

$\lambda$ , Å	Переход	$f_{ij}$
3944.01	$3p^2P_{1/2}^0 - 4s^2S$	0.1145
3961.52	$3p^2P_{3/2}^0 - 4s^2S$	0.1151
6696.03	$4s^2S - 5p^2P_{3/2}^0$	0.0137
6698.68	$4s^2S - 5p^2P_{1/2}^0$	0.0069
7362.29	$3d^2D - 7d^2F^0$	0.0260
7836.13	$3d^2D - 6d^2F^0$	0.0470

Для исследования нами были выбраны 6 линий: две резонансные ( $\lambda\lambda$  3944.01 Å, 3961.52 Å) и четыре субординатные ( $\lambda\lambda$  6693.03 Å, 6698.68 Å, 7362.29 Å, 7836.13 Å), в диапазоне длин волн от 3900 до 9000 Å, доступном наблюдению с помощью современных куде-эшелле спектрометров. Длины волн выбранных нами линий и их силы осцилляторов представлены в табл. 1.

В наших расчетах рассматриваются 272 перехода между уровнями представленной модели атома Al I, 47 из которых являются линеаризуемыми. При получении теоретических профилей и эквивалентных ширин нами учитывались доплеровское уширение от теплового движения и микротурбулентности  $V_{\text{turb}}$ , естественное затухание и ван-дер-ваальсовское уширение, рассчитываемое по формуле Грея с константами  $C_6$ , определенными согласно оценке Унзоляда [7]. Для разрешенных переходов учитывались ударное возбуждение и ионизация атомами водорода согласно формуле Дравина (с масштабирующим коэффициентом  $k_H = 1/3$ ). Более подробно методика проведения подобных не-ЛТТР-расчетов для различных элементов неоднократно описывалась в ряде статей (например, [8–10]).

Тестирование представленной модели атома Al и уточнение некоторых параметров исследуемых линий было проведено на основе анализа спектра Солнца (использовался атлас Куруца [6]). Солнце выбрано как звезда с надежно измеренными фундаментальными параметрами, для которой имеются наблюдения высокого качества. Таким образом, для Солнца можно анализировать профили линий, которые содержат больше информации, чем эквивалентные ширины.

Результат согласования наблюдаемых профилей линий Al I с теоретическими не-ЛТТР-профилями позволяет произвести уточнение параметров выбранных линий с целью их дальнейшего использования при анализе химического содержания Al в звездах поздних классов. В частности, при расчете профилей исследуемых линий, которые могут использоваться при определении содержания Al I, ван-дер-ваальсовское уширение учитывалось с константами  $C_6$ , определенными из сравнения теоретических и наблюдаемых профилей линий в спектре Солнца.

На рис. 2 представлен пример согласования профилей для двух из рассматриваемых линий.

После тестирования модели атома и уточнения параметров исследуемых линий нами были проведены расчеты не-ЛТТР-поправок для сетки моделей атмосфер [11] в диапазоне параметров:  $T_{\text{eff}} = 4000 \div 9000$  К (с шагом 250 К),  $\log g = 0.0 \div 4.5$  (с шагом 0.5), и трех содержаний тяжелых элементов –  $[A] = 0.0, -1.0, -2.0$ .

Как было показано нами ранее [12], для Al I имеет место явление «сверхионизации». Основное состояние  $3p$  атома Al I недонаселено в области формирования спектральных линий. Механизм недонаселения связан с доминированием процессов ионизации ультрафиолетовым излучением с основного уровня над каскадными переходами с высоко возбужденных уровней, причиной чего является большое значение сечения ионизации основного состояния  $3p$ .

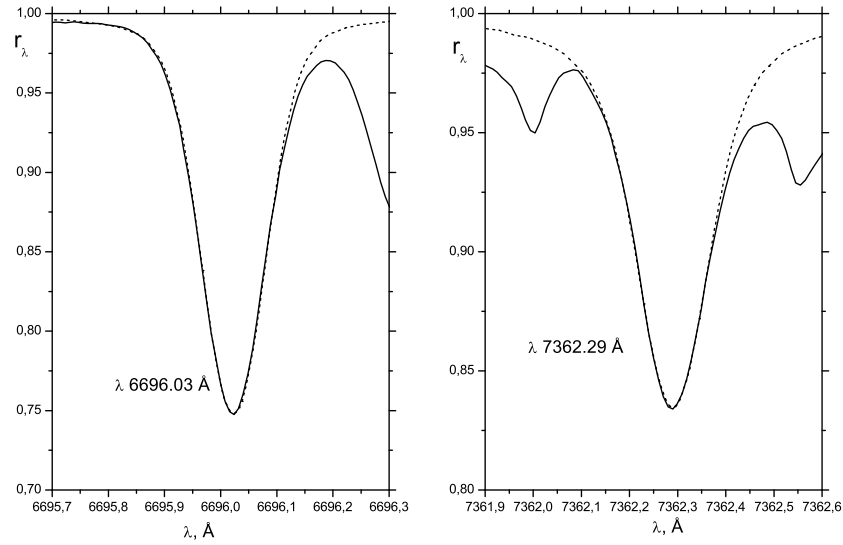


Рис. 2. Согласование теоретических профилей (штриховая линия)  $\lambda$  6696.03 Å и  $\lambda$  7362.29 Å с наблюдаемыми (сплошная линия) в спектре Солнца

Поведение  $b$ -факторов<sup>1</sup> отдельных уровней Al I с глубиной для моделей звезд с различными эффективными температурами и металличностью представлено нами в работе [12]. Там же показано, что аналогичная картина наблюдается и для случая малой металличности, при этом эффект «сверхионизации» выражен ещё сильнее.

Так как  $b$ -факторы всех уровней меньше 1, то происходит уменьшение по сравнению с ЛТР коэффициента поглощения в линиях. Для оптического излучения значения функции источников в линии  $S_\nu$  становятся больше значений функции Планка, то есть линии Al I будут ослаблены по сравнению с ЛТР. Следовательно, не-ЛТР-поправки к содержанию Al должны быть положительными, что и было получено нами для исследуемых линий.

Для рассматриваемых линий Al I вычислены не-ЛТР-поправки к содержанию Al, определенного в предположении ЛТР:  $\Delta X_{\text{NLTE}} = \log \epsilon_{\text{NLTE}} - \log \epsilon_{\text{LTE}}$ .

Часть результатов – не-ЛТР-поправки к содержанию Al I для субординатных линий  $\lambda$  6693.03 Å, 7362.29 Å для звезд нормальной металличности и не-ЛТР-поправки к содержанию Al I для одной из резонансных линий  $\lambda$  3944.01 Å для звезд с малым содержанием тяжелых элементов  $[A] = -2.0$  – была представлена нами в работе [12].

В настоящей работе представлены сетки не-ЛТР поправок для определения содержания алюминия по резонансной линии  $\lambda$  3961.52 Å для звезд с обычным и малым содержанием тяжелых элементов  $[A] = -2.0$  (рис. 3), а также сетки не-ЛТР-поправок для субординатных линий  $\lambda$  6698.68 Å, 7836.13 Å для моделей атмосфер с нормальным содержанием тяжелых элементов (рис. 4).

Не-ЛТР-поправки к содержанию алюминия достигают величин  $0.15 \div 0.25$  dex для субординатной линии  $\lambda$  6698.68 Å и  $0.4 \div 0.7$  dex для субординатной линии  $\lambda$  7836.13 Å; для резонансной линии  $\lambda$  3961.52 Å не-ЛТР-поправки достигают величин  $0.2 \div 0.45$  dex, а в случае малой металличности ( $[A] = -2.0$ ) для некоторых моделей атмосфер –  $0.6 \div 0.8$  dex.

<sup>1</sup>  $b$ -фактор – величина, характеризующая отклонение населенностей уровней от равновесных, вычисляемых по формулам Больцмана–Саха:  $b_i = n_{i\text{NLTE}}/n_{i\text{LTE}}$

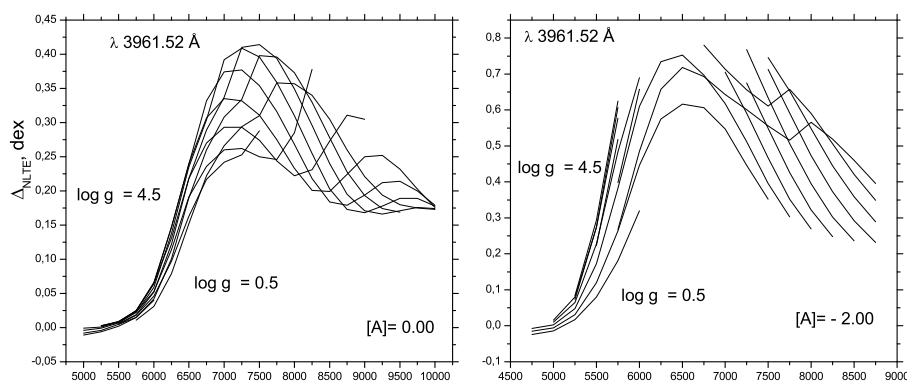


Рис. 3. Не-ЛТЭ-поправки к содержанию Al I для резонансной линии  $\lambda$  3961.52 Å для моделей атмосфер звезд различной металличности

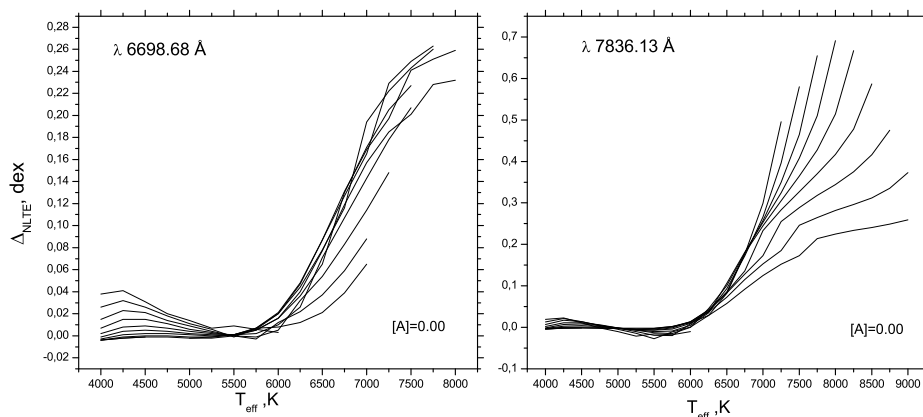


Рис. 4. Не-ЛТЭ-поправки к содержанию Al I для субординатных линий  $\lambda\lambda$  6698.68 Å, 7836.13 Å для моделей атмосфер звезд с солнечным содержанием тяжелых элементов

Так же как и в предыдущей работе [12], отмечаем, что данные поправки несущественны для звезд классов F–K, возрастают для звезд с более высокими эффективными температурами и при этом слабо изменяются в зависимости от  $\log g$ .

С учетом полученных результатов следует особо отметить, что при малой металличности ( $[A] < 0.0$ ) не-ЛТЭ-поправки для резонансных линий  $\lambda = 3944.01$  Å и  $\lambda = 3961.52$  Å нужно учитывать в любом случае.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-02-01145-а).

### Summary

*V.S. Menzhevitski, V.V. Shimansky, N.N. Shimanskaya. Non-LTE Modelling of Al I Lines in Atmospheres of Late-Type Stars.*

In this work, the results of the analysis of Al I lines forming in atmospheres of late-type stars (A–K) without assumption of local thermodynamic equilibrium are presented. We developed a 39-level model of aluminum atom containing levels with  $l \leq 3$  and  $n \leq 12$  of Al I, and a level corresponding to the ground state of Al II.

Based on the study of the line profiles and equivalent widths in the solar spectrum, we refined some atomic parameters for Al I lines ( $\lambda\lambda$  3944.01 Å, 3961.52 Å, 6693.03 Å, 6698.68 Å, 7362.29 Å, 7836.13 Å).

For the selected Al I lines, grids of non-LTE corrections to the Al abundance defined with the LTE assumption were calculated. The results of the calculations for Kurucz's atmosphere models (in a wide range of stellar parameters) allows us to conclude that the Al I atom is in an overionization state: the  $3p$  level is underpopulated in the line formation region. This is due to the dominance of ionization processes from the ground level by UV radiation over the cascade transitions from the high-excited levels, which is caused by a great value of the  $3p$  level ionization cross section. This effect becomes more pronounced with increasing temperature and decreasing metallicity of the star.

Non-LTE corrections to the Al abundance reach  $(0.15 \div 0.25)$  dex for subordinate line  $\lambda$  6698.68 Å,  $(0.4 \div 0.7)$  dex for subordinate line  $\lambda$  7836.13 Å,  $(0.2 \div 0.45)$  dex for resonance line  $\lambda$  3961.52 Å, and it is  $(0.6 \div 0.8)$  dex in the case of low metallicity ( $[A] = -2.0$ ) for certain atmosphere models.

**Key words:** chemical composition, aluminum abundance, statistical equilibrium, line formation, late-type stars, non-LTE corrections.

### Литература

1. *Seaton M.J., Zeippen C.J., Tully J.A., Pradhan A.K., Mendoza C., Hibbert A., Berrington K.A.* The Opacity Project – Computation of Atomic Data // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* – 1992. – V. 23. – P. 19–43.
2. *Ivanova D.V., Shimansky V.V.* NonLTE Analysis of the Na I Lines in the Solar Spectrum // *Odessa Astron. Publ.* – 1996. – V. 9. – P. 66–67.
3. *Mashonkina L.I., Shimanskaya N.N., Shimansky V.V.* Laws in Behaviour of NonLTE Effects for the Na I and Mg I Atoms for K–A Stars // *Odessa Astron. Publ.* – 1996. – V. 9. – P. 78–79.
4. *Сахибуллин Н.А.* Программные комплексы по расчету не-ЛТР эффектов в спектрах звезд // *Труды Казан. гор. астрон. обсерв.* – 1983. – Т. 48. – С. 9–21.
5. *Auer L.H., Heasley J.* An alternative formulation of the complete linearization method for the solution of non-LTE transfer problems // *Astrophys. J.* – 1976. – V. 205, No 1. – P. 165–171.
6. *Kurucz R.L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm (National Solar Observatory Atlas No 1). – Sunspot, New Mexico: Nat. Solar Observ., 1984. – 240 p.
7. *Unsold A.* Physik der Sternatmosphären. – Berlin–Gottingen–Heidelberg: Springer, 1955. – 630 p.
8. *Иванова Д.В., Шиманский В.В.* Не-ЛТР анализ формирования линий К I в спектрах А–К звезд // *Астрон. журн.* – 2000. – Т. 77. – С. 432–446.
9. *Машонкина Л.И., Шиманский В.В., Сахибуллин Н.А.* Не-ЛТР эффекты в спектральных линиях Na I в атмосферах звезд разных типов // *Астрон. журн.* – 2000. – Т. 77. – С. 893–908.
10. *Шиманская Н.Н., Машонкина Л.И.* Ревизия содержания Mg у звезд гало и диска Галактики // *Астрон. журн.* – 2001. – Т. 78. – С. 122–136.
11. *Kurucz R.L.* ATLAS9 Stellar Atmospheres Programs and 2 km s<sup>-1</sup> Grid (CD-ROM). – Cambridge: Smithsonian Astrophys. Observ., 1993.

- 
12. Менжевицкий В.С., Шиманский В.В., Шиманская Н.Н. Результаты не-ЛТР моделирования линий Al I в спектрах звезд поздних классов // Кинем. и физ. неб. тел. – 2009. – Прил. к № 6. – С. 210–213.

Поступила в редакцию  
24.01.11

---

**Менжевицкий Владимир Сергеевич** – ассистент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *vt@ksu.ru*

**Шиманский Владислав Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *Slava.Shimansky@ksu.ru*

**Шиманская Нелли Николаевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *Nelli.Shimanskaya@ksu.ru*